中国生态农业学报 2016 年 10 月 第 24 卷 第 10 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2016, 24(10): 1339−1346

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160182

硝酸盐反射仪和 SPAD 法对玉米氮素营养诊断的比较*

夏文豪[1] 刘 涛[1] 关 钰[1] 王 进[2] 褚贵新[1**]

(1. 石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点试验室 石河子 832003;
2. 乌兰乌苏农业气象试验站 石河子 832003)

摘 要 精准的营养诊断是了解作物氮素营养及推荐施肥的基础。本文在田间滴灌条件下利用 SPAD 叶绿素仪(SPAD-502 Plus)和硝酸盐反射仪(RQ flex10)两种诊断方法对玉米关键生育时期的氮素营养诊断进行研究，旨在筛选出适宜的诊断方法，并依据诊断值建立滴灌玉米不同生育时期的施肥模型。试验设置 0 kg(N)·hm^{-2}(N_0)、225 kg(N)·hm^{-2}(N_{225})、330 kg(N)·hm^{-2}(N_{330})、435 kg(N)·hm^{-2}(N_{435})和 540 kg(N)·hm^{-2}(N_{540}) 5 个施氮水平，在不同生育时期测定了玉米叶片 SPAD 值和叶鞘 NO_3^-含量，并分别与施氮量、植株全氮含量、产量进行方程拟合，比较两种诊断方法对玉米氮素营养的响应。研究结果表明: 1)玉米叶片 SPAD 值和叶鞘 NO_3^-含量均随施氮量的增加而显著升高，且在拔节期对施氮量的响应最敏感。叶鞘 NO_3^- 含量对施氮量变化的响应较 SPAD 值大，其与施氮量及玉米产量的拟合度均高于 SPAD 值，说明硝酸盐反射仪法对滴灌玉米氮素丰缺的反应更灵敏。2)玉米全氮含量与叶片 SPAD 值呈显著线性关系，而与叶鞘 NO_3^- 含量则以线性加平台表示。当叶鞘 NO_3^-含量小于 186 mg·L^{-1} 时，植株全氮与 NO_3^- 间呈显著线性相关；当叶鞘 NO_3^- 含量大于 186 mg·L^{-1} 时，植株全氮随 NO_3^- 含量增加趋于不变。3)本农作区滴灌玉米最佳经济施氮量为 402.5 kg·hm^{-2}，对应的玉米产量为 17 049 kg·hm^{-2}。玉米拔节期、抽雄吐丝期和灌浆期的临界叶鞘 NO_3^- 含量分别为 729.3 mg·L^{-1}、536 mg·L^{-1} 和 81.2 mg·L^{-1}。SPAD 叶绿素仪和硝酸盐反射仪均可对滴灌玉米进行氮素营养诊断，但硝酸盐速测值能更敏感地反映氮素丰缺状况，基于硝酸盐反射法进行作物氮素营养诊断及推荐施肥具有较好的准确性与适用性。

关键词 施氮量 玉米 氮素营养 硝酸盐反射仪 叶绿素仪 SPAD 值 叶鞘 NO_3^-含量 营养诊断
中图分类号: S513; S143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)10-1339-08

Comparison of RQ flex and SPAD methods of diagnosing maize (*Zea mays*) nitrogen nutrient*

XIA Wenhao[1], LIU Tao[1], GUAN Yu[1], WANG Jin[2], CHU Guixin[1**]

(1. College of Agronomy, Shihezi University / Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture, Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi 832003,China; 2. Wulanwusu Agro-meteorological Experiment Station, Shihezi 832003, China)

Abstract Precise and prompt approach of crop nutrient diagnosis is the prerequisite in determining crop N content and the recommendation of reasonable amount of N fertilizer. In this study, a field experiment was carried out under drip irrigation condition, the chlorophyll equipment (SPAD-502 Plus) and nitrate reflectrometer (RQ flex10) was employed in terms of diagnosis of maize N nutrition during key growth stages. The aim of the study was to build maize fertilization mode by using the most suitable diagnosis approach. Five N fertilizer application rates were arrayed, including N_0 [0 kg(N)·hm^{-2}], N_{225} [225 kg(N)·hm^{-2}], N_{330} [330 kg(N)·hm^{-2}], N_{435} [435 kg(N)·hm^{-2}] and N_{540} [540 kg(N)·hm^{-2}]. The difference of diagnostic effect between SPAD-502 Plus and RQ flex10 methods on maize plant N nutrient were compared based on correlation analysis.

* 国家"十二五"科技支撑项目(2012BAD42B02)资助
** 通讯作者: 褚贵新，主要从事植物营养生理生态、土壤微生物分子生态研究。E-mail: chuguixinshzu@163.com
夏文豪，主要从事作物养分资源高效利用研究。E-mail: xiawenhaohh@163.com
收稿日期: 2016−02−27 接受日期: 2016−06−12

* The study was funded by the National Key Technologies R&D Program of China (2012BAD42B02).
** Corresponding author, E-mail: chuguixinshzu@163.com
Received Feb. 27, 2016; accepted Jun. 12, 2016

The analysis compared the relationships between corn leaf SPAD and leaf sheath NO_3^- concentration for various N fertilizer application rates, plant total N content and yield during different maize growth stages. Also the sensitivities of the RQ flex 10 and SPAD methods of diagnosis of maize plant N nutrient were compared. The results were as follows: 1) Maize leaf SPAD and leaf sheath NO_3^- concentration significantly increased with increasing N fertilizer application rate and the most sensitive period was from jointing stage to either tassel-emergence stage or grain-filling stage. The response of sheath NO_3^- concentration to N application rate was more sensitive than that of SPAD. This resulted into a higher degree of fit between NO_3^- concentration determined by RQ flex 10 method and N application rate or maize yield. RQ flex 10 method was more sensitive in diagnosis of maize N nutrition. 2) The total N content in maize had a significant linear correlation with leaf SPAD, while there was linear and then a constant correlation between the total N and sheath NO_3^- concentration. That was, total N content was linearly correlated with NO_3^- concentration as corn sheath NO_3^- concentration less than 186 mg·L^{-1}, however, total N content varied slight when sheath NO_3^- concentration exceeding 186 mg·L^{-1}. 3) The recommended economic fertilizer application rate in maize under drip irrigation was 402.5 kg·hm^{-2}, which produced a yield of 17 049 kg·hm^{-2}. The critical NO_3^- concentration was 729.3 mg·L^{-1} at jointing stage, 536 mg·L^{-1} at tassel emergence stage and 81.2 mg·L^{-1} at grouting stage, respectively. In conclusion, our study showed that both the chlorophyll meter and RQ flex 10 were suitable for maize N nutrient diagnosis. Moreover, the RQ flex 10 approach was a more sensitive method than the chlorophyll meter in diagnosing maize N nutrient status. The study suggested that the RQ flex method was highly suitable for the recommendation of N fertilizer as well as better N resource management in maize fields.

Keywords N application rate; Maize; Nitrogen nutrient; Nitrate reflectrometer; Chlorophyll meter; SPAD reading; Sheath NO_3^- concentration; Nutrient diagnosis

作物营养诊断是通过简便、快捷的手段准确获取作物某一生育时期的营养状况，并以此为依据进行诊断与施肥推荐的一项综合技术。虽然植株全氮可很好地反映作物氮素营养，且与作物产量紧密相关[1]，但测定中存在着化学分析环节多、时间长、操作技术要求高等缺点。现代农业生产更需要精准、迅速、便捷的作物氮素营养轻简诊断技术，近年来 SPAD 叶绿素仪、硝酸盐反射仪及遥感光谱仪 Greenseeker 被逐渐应用到作物氮素营养诊断中来[2]。党蕊娟等[3]证实夏玉米(*Zea mays*)不同叶层的 SPAD 值与含氮量显著相关，通过测定叶片中叶绿素含量可了解作物氮营养状况，并且可进一步预测作物产量[4]；陈晓群等[5]利用叶绿素仪法进行水稻(*Oryza sativa*)田间氮肥管理；胡昊等[6]尝试通过 SPAD 值和 NDVI 值对冬小麦(*Triticum aestivum*)产量进行估算；Piekkielek 等[7]与 Francis 等[8]均报道了利用叶绿素仪读取作物 SPAD 值预测作物氮肥追施量，并进行施肥指导。硝态氮是反映旱作物氮素状况的敏感指标，Papastylianou 等[9]研究了以硝酸盐反射仪测定 NO_3^-代替全氮作为氮营养诊断指标，认为可用该方法估计植株氮素营养状况及推荐追肥。我国在 20 世纪末初步建立了小麦、玉米的硝酸盐诊断追肥技术体系[10]。王晓静等[11]采用反射仪测量棉花(*Gossypium* sp.)叶柄硝酸盐浓度进行植株氮素营养诊断并且指导施肥。虽然叶绿素仪具有操作简单、数据获取迅速等优点，但 SPAD 读数受光照辐射度的影响较大[12]，且该方法需要测定多株作物以其平均值作为测定结果，工作量较大[13]。郭建华等[14]研究认为虽然作物组织中 NO_3^-含量能灵敏反映作物氮素营养状况，但当植株体内 NO_3^-含量高时，测定结果不稳定。说明不同的氮素诊断方式具有一定的适用性和局限性，而筛选出作物较适宜的诊断方式在农业生产中显得尤为重要。前人基于氮素诊断技术研究较多，大部分阐述单一诊断技术在作物营养诊断及施肥的应用，鲜有针对作物利用不同技术进行氮素诊断，进而系统比较不同诊断技术的准确性与适用性。本方法旨在筛选确立玉米较优的氮素诊断方法，并依此推荐施肥。

天山北坡绿洲是新疆重要的节水滴灌农业区。在滴灌水肥一体化农作模式下，化肥氮追施量通常占施氮总量 80%以上，在不同生育阶段通过 5~7 次随水滴施，以满足作物氮素营养需求[15−16]。在这种施肥模式下，及时对作物不同生育时期氮素营养进行准确诊断是确定每次随水滴施追肥推荐用量的前提。为此比较研究了叶绿素仪和硝酸盐反射仪法在滴灌玉米氮素营养诊断上的应用效果，以期得出适合滴灌玉米的氮素营养诊断方法，并为玉米不同生育阶段的氮肥精准追施提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2013 年在新疆沙湾县乌兰乌苏气象站

进行(44°17′N, 85°51′E)。该站平均海拔 450 m，年均降雨量约 187.7 mm。试验区土壤类型为灌溉灰漠土(Calcaric Fluvisal)，质地为壤土，耕层(0~20 cm)土壤 pH 8.52，有机质 18.73 g·kg^{-1}，全氮 0.96 g·kg^{-1}，速效磷 23.87 mg·kg^{-1}，速效钾 340.95 mg·kg^{-1}。供试作物为玉米，品种为春玉米'良玉 66 号'(*Zea mays* cv Liangyu 66)。

1.2　田间试验设计

研究采用滴灌小区试验，试验设计 5 个施氮水平，分别为 0 kg(N)·hm^{-2} (N_0)、225 kg(N)·hm^{-2} (N_{225})、330 kg(N)·hm^{-2}(N_{330})、435 kg(N)·hm^{-2} (N_{435})和 540 kg(N)·hm^{-2} (N_{540})，3 次重复，共计 15 个小区，采用随机区组排列。供试氮肥为尿素(N≥46.6%)，磷肥为磷酸一铵(N≥12%，P_2O_5≥61%)，钾肥为硫酸钾(K_2O≥51%)。

4 月 27—28 日播种，5 月 5—6 日出苗。40 cm+80 cm 宽窄行覆膜种植，膜宽 70 cm，膜间距 60 cm，株距 14.5 cm，一膜 2 行，铺设 1 条滴灌带，种植密度为 114 945 株·hm^{-2}。每小区 4 膜，小区面积 38.4 m^2 (4.8 m × 8.0 m)。生育期内总灌水量为 6 750 m^3·hm^{-2}，磷肥用量为 90 kg(P_2O_5)·hm^{-2}，钾肥用量为 90 kg(K_2O)·hm^{-2}，氮肥、磷肥和钾肥全部作追肥随水滴施，生育期内共滴水 10 次，随水施肥 8 次，各生育时期田间管理措施等同当地大田。各生育时期滴水施肥分配比例见表 1。

表 1　滴灌玉米不同生育时期水肥分配比例

Table 1　Proportion of water and fertilizer distribution during drip irrigation at different maize growth stages

生育期 Growth stage	出苗后天数 Days after seedling emergence (d)	滴水分配比例 Water distribution proportion (%)	肥料分配比例 Fertilizer distribution proportion (%)		
			N	P_2O_5	K_2O
苗期 Seedling stage	50	13	15	10	20
拔节期 Jointing stage	60	13	10	15	20
小喇叭口期 Small bell mouth stage	68	13	15	15	20
大喇叭口期 Big bell mouth stage	75	12	15	15	20
抽雄期 Tassel emerge stage	82	12	15	12	5
抽丝期 Silking stage	90	10	12	13	5
灌浆期 Filling stage	100	10	10	10	5
乳熟期 Milk-ripe stage	110	8	8	10	5
蜡熟期 Wax ripeness stage	120	6	0	0	0
完熟期 Complete ripeness stage	135	3	0	0	0

1.3　测试指标及方法

叶片 SPAD 测定：分别在玉米拔节期(大喇叭口期)、抽雄吐丝期、灌浆期选择晴朗无云天气进行测定，测定时段为上午 10:00—12:00。拔节期测定最上部完全展开叶，抽雄吐丝期和灌浆期测定穗位叶。用叶绿素仪(SPAD-502Plus，日本产)在叶缘和叶脉的 1/4、2/4、3/4 处测定并取平均值。每小区随机抽取无损伤且长势均匀的 10 株进行测定。

叶鞘 NO_3^-含量测定：与叶片 SPAD 值测定同时进行，上午 10:00—12:00 作物体内代谢处于动态平衡状态，体内储存的硝酸盐最能反映养分吸收和同化之间的相对关系。1)取样：拔节期取最上部完全展开叶的叶鞘部位，抽雄吐丝期和灌浆期则取穗位叶的叶鞘部位。每个小区随机抽取无损伤且长势均匀的 3 株玉米植株进行取样。2)测定：取样完毕后立即在田间直接测定，以避免植株 NO_3^-含量的变化，引起误差。用榨汁器对叶鞘进行榨汁并提取组织待测液，用专用试纸条蘸取待测液在硝酸盐反射仪(RQ flex10，德国 Merck 公司产)上进行测定，每个样品测定 3 次平行，取平均值。由于不同生育时期植株叶鞘 NO_3^-浓度不同，未超出测定量程的可直接用待测液测定，超出的则需用蒸馏水稀释一定倍数后进行测定。

植株全氮的测定：样品粉碎后，采用凯氏定氮法测定其全氮含量。

产量测定：在成熟期取样进行考种，并实收测定小区产量。

1.4　数据分析

数据处理采用 Microsoft Excel 2013、SPSS 20.0 和多元统计分析软件 GraphPad Prism 5.0 (GraphPad Software, San Diego, USA)进行作图，采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)及 LSD 多重比较法(α=0.05)分析处理间差异显著性，变量相关性分析均用全部观测值进行。

2 结果与分析

2.1 玉米叶片 SPAD 值与叶鞘 NO_3^- 含量的动态变化

由图 1A 可知，玉米叶片 SPAD 值(以下简称 SPAD 值)变化范围为 45.3~56.5，SPAD 值随玉米生育进程而升高，且在各时期均随施氮量增加而增加，其中以 N_{540} 处理表现最高。各施氮处理的 SPAD 值显著高于 CK(N_0)处理(P<0.05)，但 N_{225}、N_{330} 和 N_{435} 施氮处理间无显著差异。由图 1B 可知，玉米叶鞘 NO_3^- 含量(以下简称 NO_3^- 含量)的变化范围为 17.0~886.7 mg·L^{-1}，NO_3^- 含量随着生育进程而降低，灌浆期各处理的 NO_3^- 含量急剧下降(低于 100 mg·L^{-1})。各生育时期均表现为玉米叶鞘 NO_3^- 含量随着施氮量的增加而升高，且各施氮处理 NO_3^- 含量显著高于 CK 处理(P<0.05)，但 N_{435} 和 N_{540} 处理间差异不显著。在玉米拔节—灌浆期叶鞘 NO_3^- 含量对施氮量的响应明显大于 SPAD 值。

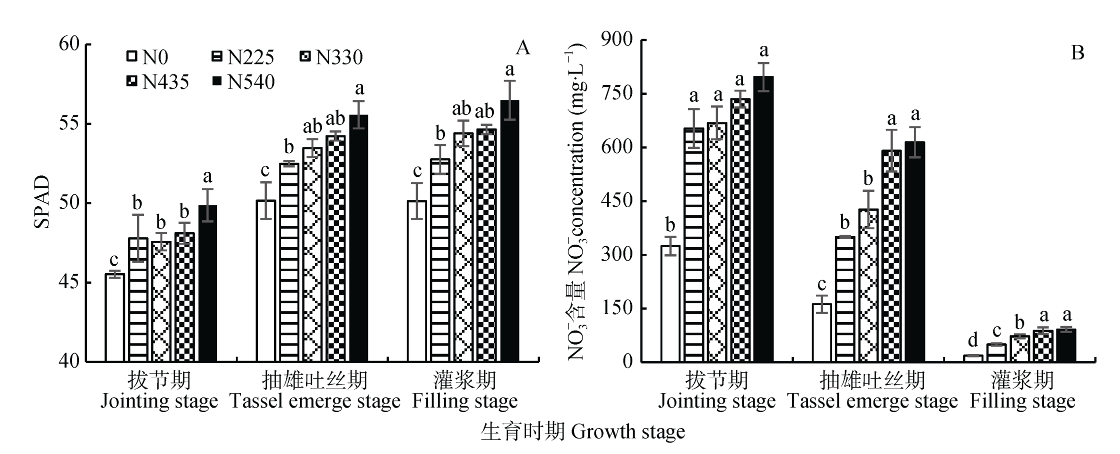


图 1 玉米不同生育时期施氮对叶片 SPAD 值(A)与叶鞘 NO_3^- 含量(B)的影响

Fig. 1 Influence of N fertilizer application rate on leaf SPAD reading (A) and sheath NO_3^- concentration (B) at different maize growth stages

N_0: 不施氮肥对照; N_{225}: 每公顷施 N 225 kg; N_{330}: 每公顷施 N 330 kg; N_{435}: 每公顷施 N 435 kg; N_{540}: 每公顷施 N 540 kg。下同。图中不同字母表示处理间差异达显著水平(P<0.05)。N_0: no nitrogen fertilization (CK); N_{225}: chemical fertilization of 225 kg N per hectare; N_{330}: chemical fertilization of 330 kg N per hectare; N_{435}: chemical fertilization of 435 kg N per hectare; N_{540}: chemical fertilization of 540 kg N per hectare. The same below. Different letters above the columns indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

2.2 玉米叶片 SPAD 值与叶鞘 NO_3^- 含量对施氮量的响应

各生育时期玉米叶片 SPAD 值和叶鞘 NO_3^- 含量均表现为随施氮量(测定前的累积施氮量)的增加呈极显著线性升高(图 2)。由 SPAD 值与施氮量的回归方程趋势线分布和回归系数可看出，玉米抽雄吐丝、灌浆期的叶片 SPAD 值随施氮量升高的增幅明显小于拔节期(图 2A)，说明拔节期 SPAD 值对供氮量的响应大于抽雄吐丝期和灌浆期。不同生育时期玉米 NO_3^- 含量随施氮量的变化趋势与叶绿素仪法相似(图 2B)，其响应最敏感时期也出现在拔节期，其次是抽雄吐丝期，灌浆期则响应最小。叶鞘硝酸盐 NO_3^- 含量在各生育时期随施氮量升高的增幅均比 SPAD 值大，表明 NO_3^- 含量较 SPAD 值能更灵敏地反映玉米植株氮素营养状况。

2.3 玉米叶片 SPAD 值、叶鞘 NO_3^- 含量及植株全氮含量间关系

如图 3 所示，在玉米拔节—灌浆期植株全氮含量、SPAD 值及 NO_3^- 含量呈不同的函数关系。玉米全氮含量随叶片 SPAD 值的增加而升高，两者呈极显著线性关系(图 3A)。植株全氮与叶鞘 NO_3^- 含量的关系则呈线性加平台关系(图 3B)。当叶鞘 NO_3^- 含量小于 186 mg·L^{-1} 时，植株全氮含量随 NO_3^- 含量增加呈线性升高；当叶鞘 NO_3^- 含量大于 186 mg·L^{-1} 时，植株全氮随着 NO_3^- 含量增加则趋于不变。由于 NO_3^- 含量变化的值域较大(17.0~886.7 mg·L^{-1})，玉米全氮含量在叶鞘 NO_3^- 含量大于 186 mg·L^{-1} 时无明显变化，而 NO_3^- 含量却发生显著变化，说明此时全氮已经不能敏感响应玉米的氮素营养状况。此外，玉米 SPAD 值与叶鞘 NO_3^- 含量关系可分别拟合出线性加平台和指数函数模型。当叶鞘 NO_3^- 含量小于 213.2 mg·L^{-1} 时，SPAD 值随着 NO_3^- 含量增加而线性升高；当叶鞘 NO_3^- 含量大于 213.2 mg·L^{-1} 时，SPAD 值随着 NO_3^- 含量增加有不变趋势(图 3C)。玉米 NO_3^- 含量随 SPAD 值增加呈指数升高，单位 SPAD 值变化可引起 NO_3^- 含量的明显变化(图 3D)。以上进一步说明，叶鞘 NO_3^- 含量较 SPAD 值可更灵敏地反映玉米氮素营养状况。

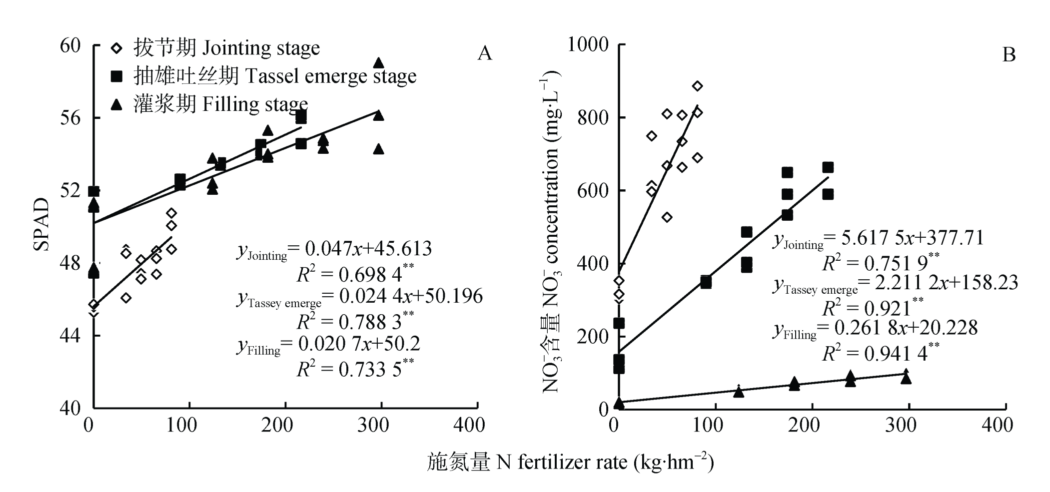


图 2　玉米不同生育时期施氮量与叶片 SPAD 值(A)、叶鞘 NO_3^-含量(B)的关系

Fig. 2　Relationship between N fertilizer application rate at different maize growth stages and leaf SPAD reading (A), sheath NO_3^- concentration (B)

表示在 0.05 水平上显著相关，下同。 indicates significant difference among treatments ($P < 0.05$), the same below.

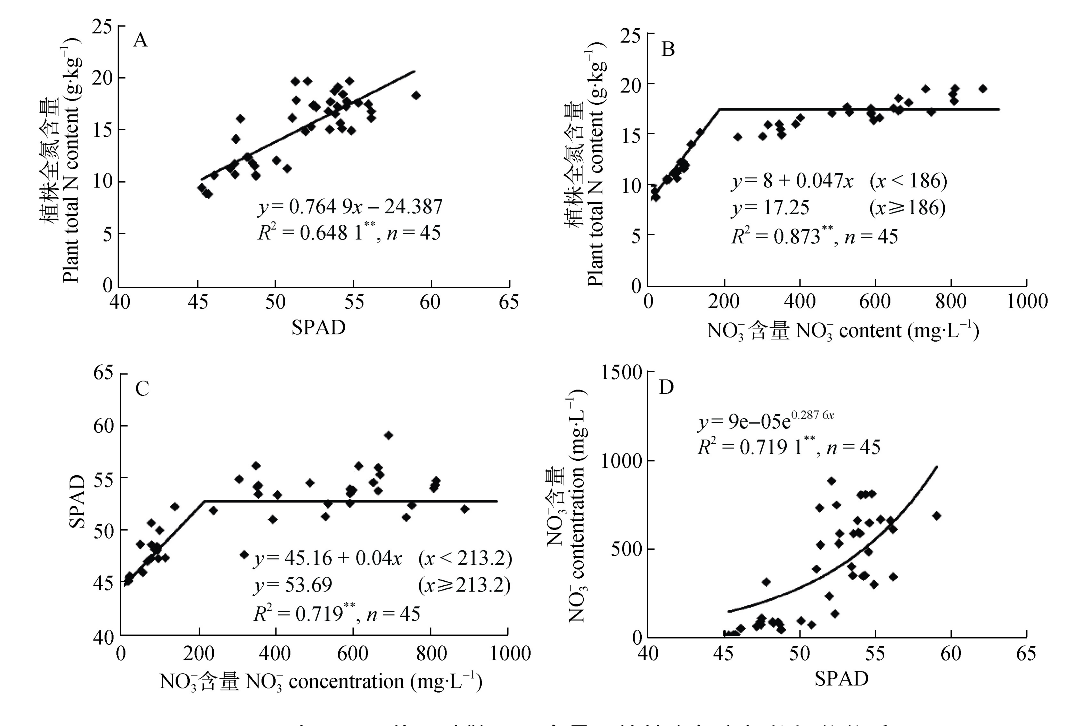


图 3　玉米 SPAD 值、叶鞘 NO_3^-含量及植株全氮之间的相关关系

Fig. 3　Relationship between SPAD reading, sheath NO_3^- concentration and maize total N content

2.4　SPAD 值、NO_3^-含量与玉米产量间关系及基于叶鞘 NO_3^-的诊断施肥模型建立

如表 2 所示，不同生育期玉米 SPAD 值、NO_3^-含量与产量均呈显著二次函数关系。玉米 NO_3^-含量与产量的拟合度均好于基于 SPAD 值的拟合度，这与氮素诊断值–施氮量的拟合结果相似(图 2)。说明硝酸盐反射仪法较 SPAD 叶绿素仪法可更准确地用于氮素营养速测诊断与施肥推荐。因此本文选择以叶鞘 NO_3^-含量作为氮素诊断值进行推荐施肥。

通过玉米产量和总施氮量进行拟合可得：$y=-0.046\ 2x^2+39.422x+8\ 665.9$ (R^2=0.883 5**, n=15)。其中方程中 y 为玉米产量，x 为施氮量。对方程求一阶导可得玉米最高产量为 17 076 kg·hm^{-2}，对应的施氮量为 426.7 kg·hm^{-2}。此施氮量可作为玉米获取最高产量的全生育期参考施氮量。计算最佳施氮量经济效应是指单位面积上获得最大经济效应的氮肥施用量，即边际产值等于边际成本时，此时单位面积的经济效应最大。参考 2014 年玉米价格为 1.75 元·kg^{-1}，尿素价格为 1.8 元·kg^{-1}，即纯氮的价格为 3.9 元·kg^{-1} (尿素纯 N 含量 46.6%)。当方程一阶导等于商品玉米与纯氮的价格比值时，可求得最佳经济施氮量为 402.5 kg·hm^{-2}，其对应的玉米产量为 17 049 kg·hm^{-2}。

将玉米最佳经济产量代入表 2 中 NO_3^-含量与产量的拟合方程(NO_3^--Y)，计算出不同生育时期的 NO_3^-含量，可作为临界 NO_3^-含量，此临界值为各生育时期判定施肥丰缺的重要指标。当实际测量值低于临界值时，则表明要追施氮肥。通过施氮量与不同生育期叶鞘 NO_3^-含量建立的线性函数，由某生育期实测的叶鞘 NO_3^-含量构建推荐施氮模型。设图 2 所示施氮量与 NO_3^-含量的线性关系中以各生育期测定前的累积施氮量为 N_{con}，全生育期的总施氮量为 N_{opt}，各生育阶段的施氮量为 N_d，生产中实际 NO_3^-测定值为 N_t，则各生育期施氮量为:

$$N_d=N_{opt}-N_{con} \quad (1)$$

由生育期 NO_3^-含量(N_t)和累积施氮量(N_{con})的线性回归关系可得:

$$N_{con}=(N_t-a)/b \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式，可得到 NO_3^-含量诊断施肥模型:

$$N_d=N_{opt}-N_t/b+a/b \quad (3)$$

公式(2)和(3)中，a 为 NO_3^-含量和施氮量线性回归方程的截距，b 为方程回归系数。将经济施肥量 402.5 kg·hm^{-2} 作为 N_{opt} (生育期总施氮量)，将其与 a、b 代入式(3)中，可得到各生育期的施肥推荐模型(表 3)。根据施肥模型可计算出各施肥阶段的单位 NO_3^-含量变动施肥量，即各生育阶段施肥模型下 NO_3^-含量变化一个单位所引起推荐施肥量的变化值。

各生育期追肥量=(各生育期临界 NO_3^-含量−实测 NO_3^-含量)×各生育期单位 NO_3^-含量变动施肥量 (4)

表 2 玉米不同生育时期叶片 SPAD 值、叶鞘 NO_3^-含量与产量的函数关系

Table 2 Correlations between leaf SPAD reading, sheath NO_3^- concentration at different maize growth stages and maize yield

生育期 Growing stage	SPAD 值(x)与产量(y)的关系 Relationship between SPAD (x) and maize yield (y)		叶鞘 NO_3^-含量(x)与产量(y)的关系 Relationship between sheath NO_3^- concentration (x) and maize yield (y)	
	拟合方程 Fitting equation	R^2	拟合方程 Fitting equation	R^2
拔节期 Jointing stage	$y=-605.08x^2+59\ 086x-1E+06$	0.574 5**	$y=-0.045\ 9x^2+66.946x-7\ 361.5$	0.726 5**
抽雄吐丝期 Tassel emerge stage	$y=-38.001x^2+5\ 172.4x-152\ 620$	0.559 5**	$y=-0.039\ 2x^2+45.708x+3\ 811.5$	0.839 9**
灌浆期 Filling stage	$y=-107.55x^2+12\ 470x-344\ 022$	0.653 8**	$y=-1.524\ 2x^2+282.61x+4\ 105$	0.891 3**

表 3 玉米各生育时期氮肥推荐模型

Table 3 Recommendation models of N fertilizer application at different maize growth stages

生育期 Growing stage	临界叶鞘 NO_3^-含量 Critical sheath NO_3^- concentration (mg·L^{-1})	施肥模型 Fertilization model	单位叶鞘 NO_3^-含量变动施肥量 N fertilizer application rate for change of per unit sheath NO_3^- concentration (kg·hm^{-2})
拔节期 Jointing stage	729.3	$N_d=-0.178\ N_t+469.7$	0.178
抽雄吐丝期 Tassel emerge stage	536.0	$N_d=-0.452\ N_t+474.1$	0.452
灌浆期 Filling stage	81.2	$N_d=-3.82\ N_t+479.8$	3.820

N_d 为施肥量; N_t 为 NO_3^-测定值。N_d is nitrogen fertilization rate; N_t is leaf sheath NO_3^- concentration measured in the filed.

3 讨论

研究表明作物氮含量与 SPAD 值间具有极显著相关性，能较好地反映作物氮素营养状况[17]。本研究中玉米叶鞘 NO_3^-浓度与土壤供氮量以及玉米氮素营养密切相关，这与米艳华等[18]研究结果一致。玉米叶鞘 NO_3^-含量在拔节期最高，且对土壤供氮量的反应最灵敏，随着生育时期的推进而呈下降趋势，至灌浆期最低。原因可能是氮素在植物体内移动性强，此时期玉米植株营养物质开始大量由叶片、叶鞘等营养器官向生殖器官(穗部)转运，氮素同化速率快，故体内游离的硝酸盐含量低。危常州等[19]在利用反射仪法诊断棉花的氮素营养时也发现了相似的硝酸盐浓度随棉花生育进程而递减变化的规律。Geyer 等[20]认为玉米 NO_3^-含量值域范围较大，由于有明显的营养级划分，可以比较数值的变化范围直观地判断出玉米在不同时期的氮素丰缺状况。SPAD 值能直接反映作物的叶绿素相对含量，叶绿素为镁卟啉化合物，相比于离子态 NO_3^-对氮素微量变化的反馈效果较差，这在本研究中也得到证实。如叶片 SPAD 值在玉米生育期变化范围较小(45.3~56.5)，而 NO_3^-含量变化范围较大(17.0~886.7 mg·L^{-1})，由 NO_3^-含量与植株全氮的线性加平台关系可看出，超过平台拐点 186 mg·L^{-1} 后，继续增加施氮量能引起 NO_3^-含量的变化，但植株全氮含量并未发生明显依变。本文通过比较可发现，叶鞘硝酸盐测定较叶绿素仪

和全氮测定更能反映过量施氮问题。李银水等[21]比较了 SPAD 叶绿素仪法、硝酸盐反射仪法和光谱仪法在油菜(*Brassica napus*)氮素营养快速诊断上的适宜性, 通过筛选认为 SPAD 值法是最适宜氮素诊断指标。而在本研究中, 结果与上述试验结果并不一致, SPAD 值取决于叶片叶绿素对特定波段光线的吸收, 但玉米不同生育时期叶片的厚度不同, 单位面积上的叶绿素分子数量不同, 从而影响叶片的 SPAD 值[22]。同时在叶片基部单位面积上叶脉数量较多, 叶绿素仪检测窗口压在叶脉上的机率也大大增加, 导致在叶基部测定结果偏低、变异较大[13], 这可作为解释本试验玉米叶片 SPAD 值不稳定的可能原因。

本研究表明叶鞘 NO_3^-含量较 SPAD 值对植株氮素反应更灵敏, SPAD 值微量的增加能引起 NO_3^-含量呈指数升高, 这与贾良良等[23]研究结果相一致。在我国北方旱地硝化作用强烈[24], 作物可以利用的氮源以硝态氮为主[25], 因此可利用硝酸盐反射仪测试植株 NO_3^-含量进行氮素营养诊断。在新疆干旱区利用硝酸盐测试法诊断氮素较为可行, 硝酸盐测定技术在实际应用中, 可根据具体情况, 将浓度控制在最佳测定范围内, 以保证结果的可靠性。在进行田间诊断时, 依本试验经验, 将压榨出的作物汁液稀释 5~10 倍后进行测定, 结果较为可靠。硝酸盐反射仪法的测试部位为作物叶鞘、叶柄及叶片, 需要进行破坏性取样, 在技术上较叶绿素仪操作复杂, 而 SPAD 叶绿素仪法属无损测试, 获取信息较反射仪更简单快捷, 并且可多次测定, 但叶绿素仪测定差异性大, 需至少测定 30 个叶片取其平均值, 其代表性大大降低[26]。综上所述, SPAD 叶绿素仪与硝酸盐反射仪均能进行田间作物氮素营养诊断, 但硝酸盐反射仪法能更准确诊断玉米氮素营养状况, 并用于建立玉米不同生育期施肥推荐模型。

本文重在阐述比较 SPAD 叶绿素仪法、硝酸盐反射仪法对滴灌玉米氮素诊断的优劣性, 对基于 NO_3^-含量构建的氮肥推荐模型需进一步验证。试验结果是由 1 年数据产生, 应利用后续的大量试验探究此诊断模型在本区域不同品种玉米的普适性, 并对其进行完善与优化。

4　结论

通过 SPAD 叶绿素仪与硝酸盐反射仪对滴灌玉米进行快速氮素诊断, 得出植株在各生育阶段 NO_3^-含量与施氮量、产量的方程拟合度均高于 SPAD 值。硝酸盐速测较 SPAD 值测定对氮素丰缺反应更灵敏, 数据更稳定。

玉米叶片 SPAD 值、叶鞘 NO_3^-含量与施氮量均呈极显著正相关($P<0.05$)。随施氮量的增加, 在不同生育时期两者呈现不同增幅, 但均以拔节期最大, 此时期诊断值对植株氮素变化反应最灵敏。在拔节—灌浆期, NO_3^-含量随氮素升高的增幅均比 SPAD 值大, 氮素响应也更敏感。

由肥料效应方程可得玉米最佳经济施氮量为 402.5 $kg\cdot hm^{-2}$, 其对应的玉米产量为 17 049 $kg\cdot hm^{-2}$。基于硝酸盐反射仪可诊断出玉米拔节期、抽雄吐丝期和灌浆期的 NO_3^-临界诊断值, 分别为 729.3 $mg\cdot L^{-1}$、536 $mg\cdot L^{-1}$和 81.2 $mg\cdot L^{-1}$, 其对应的单位 NO_3^-含量变动施肥量为 0.178 $kg\cdot hm^{-2}$、0.452 $kg\cdot hm^{-2}$和 3.82 $kg\cdot hm^{-2}$。当 NO_3^-实测含量低于该生育阶段的临界值时, 可依据单位 NO_3^-含量变动施肥量精准计算出需要追加的施氮量。

参考文献　References

[1] Leight R A, Johnston A B. Nitrogen concentrations in field-grown spring barley: An examination of the usefulness of expressing concentrations on the basis of tissue water[J]. The Journal of Agricultural Science, 1985, 105(2): 397–406

[2] 贾良良, 陈新平, 张福锁. 作物氮营养诊断的无损测试技术[J]. 世界农业, 2001(6): 36–37
Jia L L, Chen X P, Zhang F S. Nondestructive testing techniques for the diagnosis of crop nitrogen nutrition[J]. World Agriculture, 2001(6): 36–37

[3] 党蕊娟, 李世清, 穆晓慧, 等. 施氮对半湿润农田夏玉米冠层氮素及叶绿素相对值(SPAD 值)垂直分布的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 54–59
Dang R J, Li S Q, Mu X H, et al. Effect of nitrogen on vertical distribution of canopy nitrogen and chlorophyll relative value (SPAD value) of summer maize in sub-humid areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 54–59

[4] 吴良欢, 陶勤南. 水稻叶绿素计诊断追氮法研究[J]. 浙江农业大学学报, 1999, 25(2): 135–138
Wu L H, Tao Q N. Nitrogen fertilizer application based on the diagnosis of nitrogen nutrition of rice plants (*Oryza sativa* L.) using chlorophyll meter[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1999, 25(2): 135–138

[5] 陈晓群, 张学军, 白建忠, 等. 基于水稻不同生育期叶绿素值推荐追施氮量的研究初报[J]. 中国农学通报, 2010, 26(7): 147–151
Chen X Q, Zhang X J, Bai J Z, et al. Preliminary study on amount of recommended topdressing nitrogen using chlorophyll SPAD of rice during different growth stage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(7): 147–151

[6] 胡昊, 白由路, 杨俐苹, 等. 基于 SPAD-502 与 GreenSeeker 的冬小麦氮营养诊断研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 748–752
Hu H, Bai Y L, Yang L P, et al. Diagnosis of nitrogen nutrition

in winter wheat (*Triticum aestivum*) via SPAD-502 and GreenSeeker[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 748–752

[7] Piekkielek W P, Fox R H. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen[J]. Agronomy Journal, 1991, 84(1): 59–65

[8] Francis D D, Piekielek W P. Assessing crop nitrogen needs with chlorophyll meters[R]. SSMG-12. Site-Secific Management Guidelines, 1998

[9] Papastylianou I, Puckridge D W. Stem nitrate nitrogen and yield of wheat in a permanent rotation experiment[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1983, 34(6): 599–606

[10] 李志宏, 张福锁, 王兴仁. 我国北方地区几种主要作物氮营养诊断及追肥推荐研究Ⅲ. 春小麦氮营养诊断及追肥推荐体系的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4): 349–356
Li Z H, Zhang F S, Wang X R. Nitrogen nutritional diagnosis and recommendation as topdressing fertilizer N for several crops in north China Ⅲ. Nitrogen nutritional diagnosis and recommendation as topdressing fertilizer N for spring wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997, 3(4): 349–356

[11] 王晓静, 张炎, 李磐, 等. 棉花氮素营养状况的诊断研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 656–661
Wang X J, Zhang Y, Li P, et al. Study on cotton nitrogen diagnosis with reflectance meter[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 656–661

[12] Hoel B O, Solhaug K A. Effect of irradiance on chlorophyll estimation with the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter[J]. Annals of Botany, 1998, 82(3): 389–392

[13] 李志宏, 张云贵, 刘宏斌, 等. 叶绿素仪在夏玉米氮营养诊断中的应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 764–768
Li Z H, Zhang Y G, Liu H B, et al. Application of chlorophyll meter on N nutritional diagnosis for summer corn[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(6): 764–768

[14] 郭建华, 赵春江, 王秀, 等. 作物氮素营养诊断方法的研究现状及进展[J]. 中国土壤与肥料, 2008(4): 10–14
Guo J H, Zhao C J, Wang X, et al. Research advancement and status on crop nitrogen nutrition diagnosis[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008(4): 10–14

[15] 宁松瑞, 左强, 石建初, 等. 新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 90–99
Ning S R, Zuo Q, Shi J C, et al. Water use efficiency and benefit for typical planting modes of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(22): 90–99

[16] 谭华, 郑德波, 邹成林, 等. 水肥一体膜下滴灌对玉米产量与氮素利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 18–23
Tan H, Zheng D B, Zou C L, et al. Effect of drip irrigation and fertilization on grain yield and nitrogen utilization of maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 18–23

[17] Samborski S M, Tremblay N, Fallon E. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(4): 800–816

[18] 米艳华, 李茂萱, 潘艳华, 等. 玉米N素营养快速诊断精准施肥技术研究[J]. 西南农业学报, 2008, 21(2): 402–407
Mi Y H, Li M X, Pan Y H, et al. Studies on precision fertilization technology for maize nitrogen nutrition rapid diagnose[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(2): 402–407

[19] 危常州, 张福锁, 朱和明, 等. 新疆棉花氮营养诊断及追肥推荐研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1500–1505
Wei C Z, Zhang F S, Zhu H M, et al. Study on cotton nitrogen diagnosis and topdressing recommendation in north Xinjiang[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 1500–1505

[20] Geyer B, Marschner H. Charakterisierung des Stickstoffversorgungsgrades bei Mais mit Hilfe des Nitrat-Schnelltests[J]. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 1990, 153(5): 341–348

[21] 李银水, 余常兵, 廖星, 等. 三种氮素营养快速诊断方法在油菜上的适宜性分析[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(5): 508–513
Li Y S, Yu C B, Liao X, et al. Applicability of three rapid methods of nitrogen nutrition diagnosis on rapeseed[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2012, 34(5): 508–513

[22] 童淑媛, 宋凤斌. SPAD值在玉米氮素营养诊断及推荐施肥中的应用[J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(2): 233–238
Tong S Y, Song F B. Application of SPAD value on N nutritional diagnosis and fertilization recommendation[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2009, 25(2): 233–238

[23] 贾良良, 陈新平, 张福锁. 叶绿素仪与植株硝酸盐浓度测试对冬小麦氮营养诊断准确性的比较研究[J]. 华北农学报, 2007, 22(6): 157–160
Jia L L, Chen X P, Zhang F S. The comparision of SPAD chlorophyll meter and sap nitrate test as N diagnosis methods for winter wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007, 22(6): 157–160

[24] 李世清, 王瑞军, 李紫燕, 等. 半干旱半湿润农田生态系统不可忽视的土壤氮库——土壤剖面中累积的硝态氮[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 1–13
Li S Q, Wang R J, Li Z Y, et al. Soil nitrogen pool not to be ignored residual NO_3^--N accumulated in soil profile in semiarid and semihumid agro-ecological system[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(4): 1–13

[25] Ferguson R B, Hergert G W, Schepers J S, et al. Site-specific nitrogen management of irrigated maize[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(2): 544–553

[26] Blackmer T M, Schepers J S, Vigil M F. Chlorophyll meter readings in corn as affected by plant spacing[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1993, 24(17/18): 2507–2516